光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20240925005

基于涡旋光相移干涉的高精度微测量技术研究

袁 涛[1],刘 吉[1*],武锦辉[2],张博洋[1],杨雪娇[1]
（中北大学 1. 信息与通信工程学院；2. 仪器与电子学院,太原 030051）

摘 要： 针对精密加工和芯片制造领域微位移高精度测量需求,提出一种基于涡旋光干涉的新型微位移测量方法。通过改进传统的马赫-曾德尔干涉系统,引入空间光调制器生成携带轨道角动量的涡旋光作为参考光源,与作用于被测物体的球面波物光发生干涉,构建具有螺旋相位特征的动态干涉条纹。系统通过监测物体微小位移引起的干涉条纹旋转变换,建立相位旋转角度与定位移量的精确对应关系。为实现精确分析物体的微位移量,结合图像处理、四步相移法和解包裹算法的相位重构体系,有效生成解包裹相位图和位移分布图。实验结果表明,该方法测量误差低于3%,重复性测量平均误差为1.4%。该系统操作简便、测试精度高且稳定可靠。

关键词： 涡旋光；微位移测量；四步相移；光学干涉
中图分类号： O439 **文章编号：** 1001－5868(2025)04－0722－05

High-Precision Non-Contact Micro-Measurement Technique Based on Vortex Light

YUAN Tao[1], LIU Ji[1], WU Jinhui[2], ZHANG Boyang[1], YANG Xuejiao[1]
（1. School of Information and Communication Engineering；2. School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, CHN）

Abstract: To measure the high-precision micro-displacement of objects, this paper proposes a measurement technique based on vortex light interference. By improving the traditional Mach－Zehnder interferometric system, a spatial light modulator is used to generate vortex light as a reference light source, which interferes with the spherical object light acting on the object to be measured and produces spiral interference fringes. Small displacements of the object cause the interference fringes to rotate, and the amount of displacement can be determined by measuring the angle of rotation. This technique combines the advantages of laser interference with image processing, a four-step phase-shifting method, and a unwrapping algorithm to generate unwrapped phase maps and displacement-distribution maps, allowing accurate analysis of the micro-displacement of the object. The experimental results show that the measurement error of this method is less than 3%, and the average error of the repeated measurements is 1.4%. The system is not only easy to operate, with high testing accuracy, but also stable and reliable, making it suitable for industries such as precision machining and chip manufacturing, providing an effective solution for high-precision displacement measurement.

Key words: vortex light; micro-displacement measurement; four-step phase shift; optical interference

收稿日期：2025－04－25.
基金项目：山西省基础研究计划资助项目(202203021211087)；山西省回国留学人员科研资助项目(2023-141).
*通信作者：刘 吉

0　引言

高精度微位移测量技术在半导体芯片制造和微机械加工领域至关重要。光学干涉测量技术[1]，凭借其非接触性、高灵敏度和高准确度等优点，已广泛应用于位移、转速等几何量的高精度测量[2-3]。随着涡旋光束制备与检测技术的不断进步，特别是利用空间光调制器（SLM）产生涡旋光的方法，以其灵活简便、稳定高效和实时动态调整的特点，在高精度测量领域展现出显著优势[4-5]。

2020年，赵冬娥等基于涡旋光与球面波干涉效应，通过测量干涉图案中心的切线斜率，实现对物体微位移量的高灵敏度和高精度测量[6]。随后，夏豪杰等进一步研究该技术，通过拟合相位变化曲线，精确获取了图像的旋转角度，以获取微小位移量[7]。2022年，Lu等采用共轭涡旋光束，并通过拟合相位变化曲线来快速准确地测量花瓣状干涉图案的旋转角度，进一步提升了测量效率和准确性[8]。同年，韩世泽等基于涡旋光与平面波干涉模型，利用多次采样并计算相位变化的均值，结合拟合曲线提取的相位数据，精确测量了位移前后的像素曲线变化，从而准确计算出干涉图案的旋转角度，实现了微位移量的高精测量[9]。

为提升位移测量的精度，本文提出一种基于四步相移技术的微位移测量方法。系统基于涡旋光与球面波的干涉原理，采用改进型马赫-曾德干涉系统结构[10]，分析了干涉图样角度改变与位移之间的线性关系。通过向SLM输入四幅具有不同相位的全息图[11-12]，实现四步相移，进而精确测量位移。

1　涡旋光微位移测量原理

涡旋光是一种具有螺旋相位波前和环形强度分布的特殊光场。相移干涉测量技术的核心在于，在光路中引入可控的光程差变化。这一变化通过CCD相机等光电探测设备进行捕捉，从而获得不同相移状态下的干涉图像。在这些图像中，每个像素点的光强都会随着相移的变化而变化。

如图1所示，在改进的马赫-曾德干涉系统中，一束光照射至空间光调制器，生成涡旋光束作为参考光。同时，另一束光穿过球透镜转变为球面波，并照射到被测物体上。两束光发生干涉后形成一系列螺旋状干涉条纹。

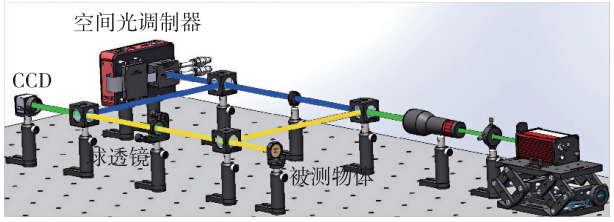


图1　涡旋光与球面波干涉系统

线性位移测量系统以干涉图案的旋转角度为核心，探究螺旋状干涉条纹旋转角度与微位移量之间的关系。在柱坐标系中，涡旋光场的表达式为：

$$E_{\text{vortex}}(x,y,z)=E_{\text{v}}\exp(-ikz+il\theta) \tag{1}$$

式中，l为涡旋光的拓扑荷数，定义相位波前绕轴线旋转的圈数，$\theta=\arctan(y/x)$为涡旋光场的方位角。涡旋光的传播特性可以通过相位因子$\exp(-ikz)$来描述，其中k是波数其值为$2\pi/\lambda$，λ为光的波长，z是涡旋中心的传播方向，光波沿z轴正方向传播。

$$E_{\text{sphere}}(x,y,z)=E_{\text{s}}\exp(ikr) \tag{2}$$

式中，球面波和涡旋光的振幅分别由E_{s}和E_{v}来表示。当涡旋光与球面波干涉时，干涉叠加生成的光强为：

$$\begin{aligned} I&=\left|E_{\text{vortex}}+E_{\text{sphere}}\right|^2 \\ &=E_{\text{v}}^2+E_{\text{s}}^2+2E_{\text{v}}E_{\text{s}}\cdot\cos(l\theta+kr-kz) \end{aligned} \tag{3}$$

当涡旋光与球面波发生干涉时，产生的干涉图案取决于两者之间的相位差。两种波形具有等同的振幅$E_{\text{s}}=E_{\text{v}}=E_0$，由于相位差的存在，对方程（3）进一步推导为：

$$\begin{aligned} I&=\left|E_{\text{vortex}}+E_{\text{sphere}}\right|^2 \\ &=E_0^2[1+2\cos(l\theta+kr+\Delta\varphi+\Delta\phi_0)] \end{aligned} \tag{4}$$

式中，$\Delta\phi_0$代表初始相位，对于沿涡旋光传播方向z的线性位移d，所引起的相位变化：

$$\Delta\varphi=kd \tag{5}$$

根据涡旋光干涉公式可知，物体的位移量可以通过相位的变化来定量描述，二者之间的关系表达式如下：

$$d=\frac{\lambda}{2\pi}\Delta\varphi \tag{6}$$

式中，d表示位移量，$\Delta\varphi$表示被测物位移所引起的干涉图样相位变化。

2　四步相移算法

位移的微小变动在干涉图样上所引起的变化，为位移测量提供了一种直观的表征。四步相移技

术，作为一项有效的测量方法，通过分析物体在位移前后8幅不同相位的干涉图样，精确捕捉相位的微小变化，并对其相位信息进行解调，进而计算出物体的位移量，重建物体表面的三维深度信息。

在实际应用中，四步相移技术结合图像处理和解包裹算法，进一步优化测量结果。解包裹算法用于解决相位信息中的包裹问题，确保相位信息的连续性和准确性。

物光的光场复振幅为：

$$U_o=\frac{A}{r}\exp(ikr) \tag{7}$$

涡旋光的复振幅为：

$$U_R=A\exp(il\theta) \tag{8}$$

球面波与涡旋光干涉所产生的光强表现为：

$$I=|U_o+U_R|^2=A^2\left[1+\frac{1}{r^2}+\frac{2}{r}\cos(kr-l\theta)\right] \tag{9}$$

在物体位移改变之前，通过调整空间光调制器的相位全息图样，对涡旋光进行精确的相位控制，实现涡旋光的以π/2的步长进行四步相移变化，如图2所示，其中相位θ分别为0，π/2，π和3π/2。获取物体位移前四步相移光强分布图，即I_{11}，I_{12}，I_{13}，I_{14}。



（a）$\theta=0$ （b）$\theta=\pi/2$ （c）$\theta=\pi$ （d）$\theta=3\pi/2$

图2 涡旋光相位分布图

被测物体发生位移后，涡旋光与球面波干涉所产生的光强为：

$$I'=A^2\left[1+\frac{1}{r^2}+\frac{2}{r}\cos\left(kr-l\theta+\Delta\varphi\right)\right] \tag{10}$$

式中，$\Delta\varphi$是因位移发生变化引起的相位变化。再次调节加载在空间光调制器上的相息图使涡旋光产生步长为π/2的相移，获取物体位移后四步相移光强分布图，即I_{21}，I_{22}，I_{23}，I_{24}。物体发生位移引起的相位变化可以通过位移前后所得的8幅强度图样获得，即：

$$\Delta\varphi=\arctan\frac{(I_{24}-I_{22})(I_{11}-I_{13})-(I_{21}-I_{23})(I_{14}-I_{12})}{(I_{21}-I_{23})(I_{11}-I_{13})+(I_{24}-I_{22})(I_{14}-I_{12})} \tag{11}$$

当待测目标发生位移时，相位的改变可以通过包裹相位来获取。为准确地从这些包裹相位中提取出物体位移的连续相位信息，进行相位解包裹的操作变得尤为重要。在这一过程中，反正切函数处理得到主值在[－π，π]的未解码相位，对获得的主值相位通过加减周期的整数倍来恢复全场完整相位值。解包裹之后获得的相位变化$\Delta\varphi$与位移量Δd的关系式如下：

$$\Delta d=\lambda\left(\frac{\Delta\varphi}{4\pi}\right) \tag{12}$$

3 系统搭建与实验分析

3.1 涡旋光相移干涉微位移测量系统

为验证理论分析结果，本实验采用改进后的马赫-曾德尔干涉系统对压电陶瓷模拟的微位移进行精密测量。实验装置的布局详见图3。实验中，使用波长为532 nm的单模绿光激光器，其发射的激光首先通过扩束系统进行扩束，随后由分束镜BS1将光束一分为二。

分出的参考光束通过偏振片P调整偏振状态，穿过分束镜BS2后通过空间光调制器产生涡旋光。该涡旋光束经SLM反射回分束镜BS2，并再次反射至分束镜BS4。与此同时，物体光束在分束镜BS1处反射，经过分束镜BS3和反射镜，通过球面透镜L3转换为球面波，最终与参考光束在分束镜BS4处汇合。两束光在分光镜BS4后发生干涉，由CCD相机捕获并记录下物体变形前后的干涉图样，随后传输至计算机进行分析。

为实现相位的精确控制，将设计的四幅相位变化在0～2π之间，步长为π/2的全息图加载至SLM，实现涡旋光的生成和四步相移调制。不仅能够精确测量由压电陶瓷模拟的微小位移，还能够通过SLM产生的涡旋光束实现高精度的相位控制。

3.2 图像优化及相位解包裹

实验通过压电陶瓷模拟物体微小位移，对其加载90 V驱动电压，压电陶瓷上升位移量为0.382 μm。通过四步相移分别采集物体位移前后各4幅图像，对干涉图样进行采集及小波自适应滤波处理操作，确保在物体位移前后都能获得高质量的图像数据。CCD相机捕获的四步相移干涉图样如图4和5所示，其中图4展示了压电陶瓷位移前采集的4幅干涉图样，图5为位移后采集的4幅干涉图样。

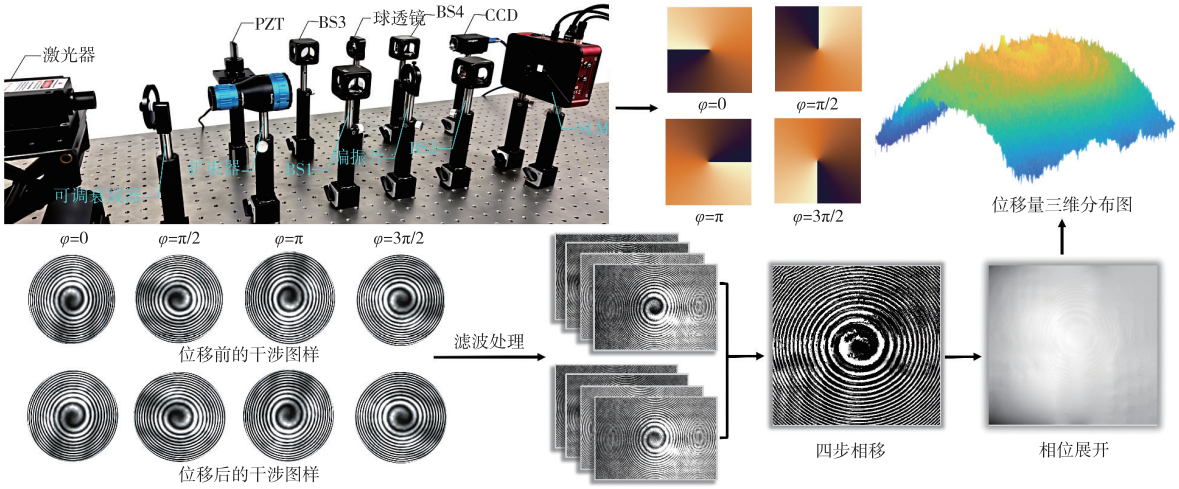
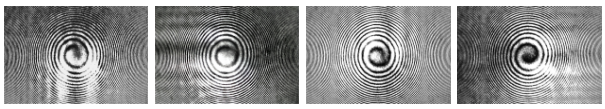
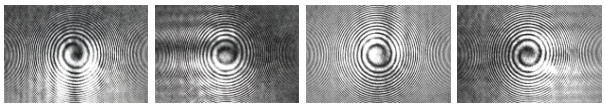


图 3　基于四步相移的涡旋光与球面波干涉微位移测量系统。



（a）第 1 幅　（b）第 2 幅　（c）第 3 幅　（d）第 4 幅

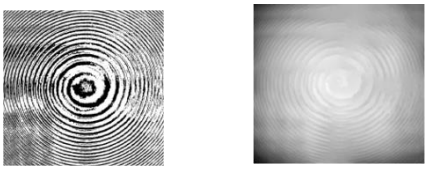
图 4　位移前四步相移干涉图样



（a）第 1 幅　（b）第 2 幅　（c）第 3 幅　（d）第 4 幅

图 5　位移后四步相移干涉图样

首先，对获取的 8 幅图片进行相位包裹处理。并利用最小二乘法解包裹算法，得到了相位解包裹图。这一处理过程和结果如图 6 所示。接下来，获得解包裹后相移三维显示图，如图 7 所示。图 8 展示了通过位移-相位关系得到的位移三维显示图。



（a）相位包裹处理结果图（b）相位解包裹处理结果图

图 6　相位包裹与解包裹处理结果

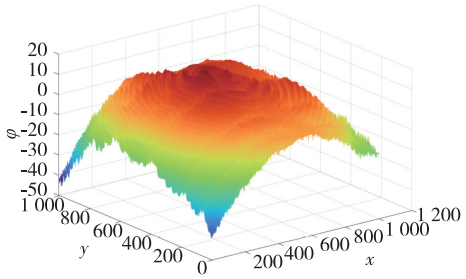


图 7　相位三维分布图

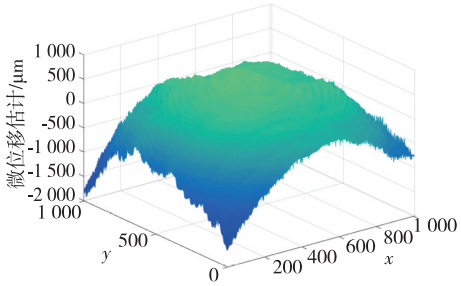


图 8　位移三维分布图

3.3　误差分析

如表 1 所示，当压电陶瓷的位移量为 0.382 μm 时，通过计算系统解包裹后平均相位，经计算位移估计值为 0.385 9 μm，与实际位移量相比误差为 3.906 8 nm，误差百分比为 1.023%。当压电陶瓷加载 60 V 驱动电压时，实际位移量为 0.243 μm 时，经计算位移估计值为 0.235 5 μm，误差为 6.989 1 nm，误差百分比为 2.876%。

表 1　系统测量结果

参数	数值 1	数值 2
位移/nm	382	243
平均相位估计结果/rad	18.231	11.504 1
系统位移估计结果/nm	771.813 6	472.021 7
位移估计结果/nm	385.906 8	236.010 8
误差/nm	3.906 8	6.989 1
误差率/%	1.023	2.876

为验证系统可靠性，进行 8 次重复对比实验，设定物体的位移值固定为 0.382 μm。实验结果如表 2 所示，平均测量误差为 5.367 nm，平均误差百分比为 1.4%。

表2 重复性实验结果

实验次数	位移估计结果/nm	误差/nm	误差率/%
1	385.906 8	3.906	1.023
2	390.104 9	8.105	2.122
3	384.766	2.766	0.724
4	386.441	4.441	1.163
5	389.881	7.881	2.063
6	389.332	7.332	1.920
7	387.393	5.393	1.412
8	385.112	3.112	0.815

4 结论

本文基于涡旋光与球面波的干涉理论,构建螺旋状干涉图样相位变化与位移的线性关系,结合四步相移算法,实现对物体微小位移的高精度测量。通过改变加载至空间光调制器的全息图,实现涡旋光的制备和四步相移,通过去噪处理、相位解包裹,进而推算出物体的位移量。经实验验证,测量误差低于3%,重复测量一致性平均误差为1.4%,该系统具有较高的准确性和可靠性,为实际应用中微小位移的高精度测量提供了一种有效的解决方案。

参考文献:

[1] Dou J, He X, Hu Y, et al. Focal length measurement based on vortex beam interference [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2024, 178:108197.

[2] Zhang L, Cao J, Wu S, et al. From concept to reality: computing visual vortex beam interferometer for displacement measurement[J]. Optics Letters, 2022, 47(21):5449-5452.

[3] Ye G, Yuan T, Zhang Y, et al. Recent progress on laser interferometry based on vortex beams: Status, challenges, and perspectives[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2024, 17: 107871.

[4] Qiu S, Zhu X, Tang R, et al. Noncoaxial RDE of circular asymmetry optical vortex for rotating axis detection [J]. Photonics Research, 2022,10(11), 2541-2548.

[5] Gao H, Yang D, Hu X, et al. High-precision micro-displacement measurement in a modified reversal shearing interferometer using vortex beams [J]. Optics Communications, 2023, 537:129454.

[6] 赵冬娥,王思育,马亚云,等. 基于涡旋光与球面波干涉的微位移测量研究[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(4):175-180.
Zhao Donge, Wang Siyu, Ma Yayun, et al. Measurement of micro-displacement based on the interference of vortex beams and spherical wave[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(4):175-180.

[7] 夏豪杰,谷容睿,潘成亮,等. 涡旋光位移干涉测量方法与信号处理[J]. 光学精密工程, 2020, 28(9):1905-1912.
Xia Haojie, Gu Rongrui, Pan Chengliang, et al. Signal processing method for displacement measurement interferometry using vortex beams [J]. Optical precision engineering, 2020, 28(9):1905-1912.

[8] Lu H, Hao Y, Guo C, et al. Nano-displacement measurement system using a modified orbital angular momentum interferometer [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2022, 58(2):1-5.

[9] 韩世泽,杨 栋,胡晓宁,等. 基于涡旋光与平面波干涉的微位移测量[J]. 光学精密工程, 2022, 30(17):2058-2066.
Han Shize, Yang Dong, Hu Xiaoning, et al. Micro-displacement measurement based on interference of vortex beams and plane wave [J]. Optical precision engineering, 2022, 30(17):2058-2066.

[10] 于 淼,王雅秋,张 鹤,等. 改进的马赫-曾德尔干涉仪测量涡旋光束的轨道角动量[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(17):87-93.
Yu Miao, Wang Yaqiu, Zhang He, et al. Measuring orbital angular momentum of vortex beam using modified mach-zehnder interferometer [J]. Advances in Laser and Optoelectronics, 2022, 59(17):87-93.

[11] 谢捷如,崔海华. 面向物体表面测量的四步相移光解码技术研究[J]. 光学学报, 2009, 29(2):370-373.
Xie Jieru, Cui Haihua. Study on four-step phase-shifting decoding algorithm for three-dimensional profilometry [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(2):370-373.

[12] 杨福俊,耿 敏,戴美玲,等. 基于单频四步相移条纹投影的不连续物体三维形貌测量[J]. 光电子·激光, 2012, 23(8): 1535-1538.
Yang Fujun, Geng Min, Dai Meiling, et al. 3D shape measurement of discontinuous objects based on single frequency fringe projection in 4-step phase shifting profilemetry [J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2012, 23(8): 1535-1538.

作者简介:

袁 涛(1999—),男,山西省运城市人,博士研究生,主要从事涡旋光场几何量测量方面的研究;

刘 吉(1980—),男,黑龙江省哈尔滨市人,教授,主要从事微弱信息感知与处理技术、光电成像技术的研究。